

# 基于激光吸收光谱多点瓦斯监测技术的研究

何莹, 张玉钧, 刘建国, 阚瑞峰, 陈玖英, 夏慧, 王敏

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 研究了可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 技术在煤矿多点瓦斯监测中的应用。分析讨论了基于光谱吸收原理的多点瓦斯实时监测系统的设计方案, TDLAS 技术、分布式光纤传感技术和时分复用的信号检测技术相结合, 实现多点气体浓度的光学传感。提出了在光路中嵌入标定池的方法来反演浓度。通过不同浓度的瓦斯气体对系统性能进行了测试, 检测限低于  $60 \times 10^{-6}$ 。研究表明系统方案可行, 该技术具有实时、连续、非接触快速检测的特点, 能够满足矿井瓦斯多点安全监测要求。

**关键词:** 激光吸收光谱; 光纤传感技术; 瓦斯; 时分复用

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2008)02-0129-05

## Study of Multipoint Gas Monitoring Technology Based on Laser Absorption Spectrum

HE Ying, ZHANG Yu-jun, LIU Jian-guo, KAN Rui-feng, CHEN Jiu-ying,  
XIA Hui, WANG Min

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The application of coal mining gas multipoint monitoring with tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technique is studied. The principle and design scheme of real-time monitoring of multipoint gas concentration system which based on spectroscopy absorption principle is analyzed. The TDLAS technique, distributed fiber sensing technique and time division multiplexing detection technique are integrated to achieve optical sensing of multipoint gas concentration. Considering the requirement of real-time measurement, a new inversion method by insetting a calibration cell with standard concentration gas into the optical path is introduced. The system's performance is tested by measuring gas of different concentrations. The detection limit is below  $60 \times 10^{-6}$ . It proves that the scheme is feasible, and the technology has characteristics of real-time, successive, non-intrusive and fast measurement, so it can meet the requirements of coal mining gas monitoring.

**Key words:** laser absorption spectroscopy; fiber sensing technique; gas; time division multiplexing

收稿日期: 2007-08-06; 修改日期: 2007-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50534050); 中科院知识创新重要方向性项目 (KJJCX2-SW-W27)

E-mail: heying@aiofm.ac.cn

## 1 引言

瓦斯是矿井中主要由煤层气构成的以甲烷为主的气体,具有易燃易爆特性。瓦斯的爆炸限是5%~16%,由于我国46%的煤矿属于高瓦斯矿,采掘时极易发生瓦斯突出现象而引发爆炸。因此,研制快速可靠地检测煤矿瓦斯浓度的系统,对瓦斯预警十分重要。

目前国内外对瓦斯的常规监测主要还是采用瓦斯催化传感器<sup>[1]</sup>,但催化元件存在使用寿命短、工作不稳定和调校频繁的缺点。可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术利用可调谐半导体激光器窄线宽和波长可调谐特性检测气体的单根分子吸收谱线,它与波长调制(WMS)技术及二次谐波检测技术相结合,是一种高灵敏度、高选择性、快速在线非接触测量的气体检测技术<sup>[2-3]</sup>,在环境监测<sup>[4]</sup>中得到了广泛应用。针对煤矿瓦斯安全监测的需要,将TDLAS技术与分布式光纤传感技术、时分复用技术相结合实现远距离网络化结构,设计了基于TDLAS的瓦斯多点实时监测系统,研究了系统方案。

## 2 基本原理

根据比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律,对于单一频率,光强为 $I_0$ 的一束光通过充有待测气体的吸收池后,透射后光强可表示为

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\sigma(\nu)NL], \quad (1)$$

其中 $L$ 为吸收光程, $N$ 为吸收气体的浓度, $\sigma(\nu)$ 为分子的吸收截面。在近红外气体吸收系数很小,满足 $|\sigma(\nu)NL| \ll 1$ ,则(1)式可以表述为

$$I(\nu) = I_0(\nu)[1 - \sigma(\nu)NL]. \quad (2)$$

利用锁相放大器可以将各次谐波分量分离出来,二次谐波信号的峰值出现在中心波长处,而且与气体产生的吸收强度成正比,所以实际应用中通常选用二次谐波信号( $2f$ )作为检测信号。将(2)式展开为傅立叶级数得到二次谐波系数的关系式<sup>[5]</sup>

$$I_{2f} \propto I_0 \sigma_0 NL, \quad (3)$$

其中 $\sigma_0$ 为吸收线中心的吸收系数,即二次谐波信

号强度与激光光强、气体吸收截面、气体浓度及光程成正比。

## 3 系统方案设计

根据HITRAN数据库,甲烷分子在近红外1653.72 nm附近跃迁吸收线的线强为 $10^{-21}$ ,且在此吸收线两侧的0.5 nm范围内没有其它气体的强吸收线,系统采用分布反馈式可调谐半导体激光器作为光源,激光器工作的中心波长是1653.72 nm,通过改变注入电流使激光波长扫描甲烷气体的单根吸收线,避免了气体干扰,从而获得甲烷的吸收光谱信号。

图1为实验装置示意图,在需要监测的地点放置一个气体传感单元,由微型光吸收池和传输光纤构成。通过温度和电流控制电路调节可调谐半导体激光器的中心波长到1653.72 nm。激光由尾纤输出,传输到光纤分束器实现多路传输,各路激光分别通过各监测点的微型光吸收池,输出的多路激光耦合到光开关中,通过光开关的切换选择其中任意一路光信号经过标定池到达探测器,经探测器光电转换后的电信号传输到锁相放大器,计算机对锁相出来的 $2f$ 信号进行A/D转换,得到甲烷吸收谱线的 $2f$ 信号,系统软件根据光路中标定池的标准 $2f$ 谱线进行浓度拟合,计算得出监测点的气体浓度。系统中所有的光信号都通过光纤传输,可以实现远距离的多点监测。在接收光路中,采用多路输入一路输出的光开关对各个监测点光信号进行切换,系统中只使用了一个探测器,一个锁相放大器,实现了仪器的时分复用,简化了系统结构,降低了成本。实际工作时只有虚线部分,即所有通过光纤连接的点式传感器在井下,没有带电部件,使用安全性高,可以实现远距离多点瓦斯浓度的实时监测。

## 4 实验结果分析

实验中进行了两个监测点的浓度测量,使用了 $1 \times 2$ 的光纤耦合器和 $1 \times 2$ 的光开关。对于本TDLAS系统,微型光吸收池是开放式的,在系统设计中提出嵌入标定池的方法:在标准池中始终充有已知标准浓度的甲烷气体,当微型光吸收池中充入甲烷后,经过气体吸收的光信号通过标准池后送入探测器,此时检测到的信号实际为叠加在标准甲烷信

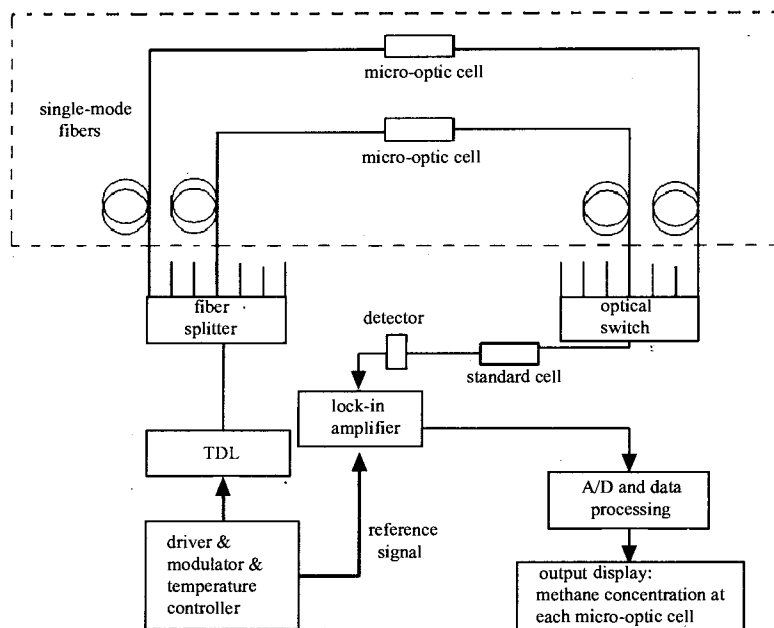


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup

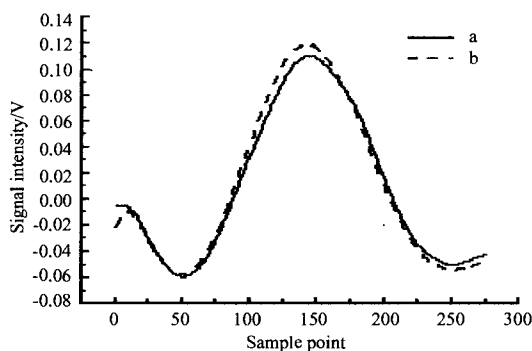


图 2 通路 1,2 的定标曲线

Fig.2 Calibration curve of channel 1 and 2

号之上的监测点甲烷信号, 可通过标准甲烷的谱线拟合来反演监测点的甲烷浓度。

设置光开关的自动切换时间为 0.5 s, 每个通路 1 s 得到一个浓度值。先向 10 cm 长的气体标准池充入 99.999% 的高纯氮气, 对其进行冲洗, 再充入 1% 的甲烷标准气体密封, 待信号稳定后利用光开关切换, 采集的  $2f$  信号如图 2 所示, 其中 a 为通路 1 的标准谱线, b 为通路 2 的标准谱线, 信号均为 50 次累加平均的结果。

#### 4.1 谐波信号检测

微型光吸收池长  $L_1 = 5$  cm, 标定池长  $L_2 = 10$

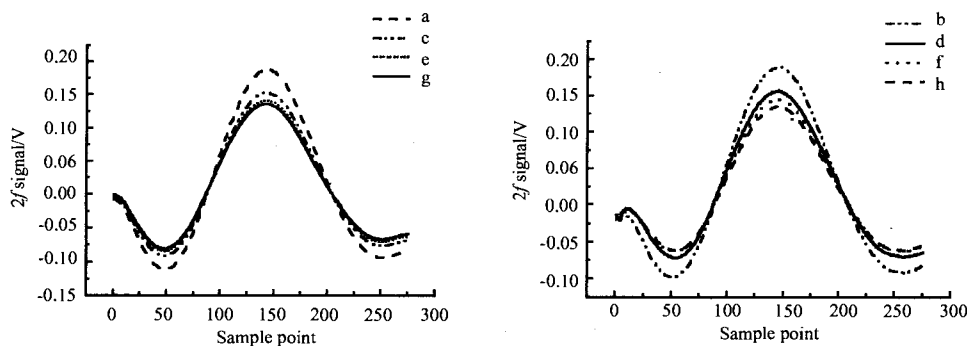


图 3 通路 1,2 不同浓度甲烷  $2f$  信号

Fig.3  $2f$  signals of channel 1 and channel 2 with methane of different concentrations

表 1 浓度与相关系数

Table 1 True concentration and correlation coefficient

True concentration	1%	0.4%	0.2%	0.1%
Correlation coefficient (channel 1)	0.99955	0.99989	0.99997	0.99998
Correlation coefficient (channel 2)	0.99997	0.99988	0.99976	0.99910

cm, 标定池中充有 1% 的标准甲烷气体, 1, 2 两个吸收池相距 5 m。实验中用几组不同浓度的甲烷气体, 以 1 l/min 的固定流速间隔充入两个微型光吸收池, 待信号稳定后测量相应的气体吸收  $2f$  信号如图 3 所示, 信号平均次数为 50 次。得到每个微型吸收池的四条谱线, 如图 3 所示, 其中 a、b 是 1% 甲烷谱线; c、d 是 0.4% 甲烷谱线; e、f 是 0.2% 甲烷谱线; g、h 是 0.1% 甲烷谱线。

由图 3 可知在保持调制频率和调制度不变的情况下  $2f$  信号的形状基本不变, 只是谱线各点的绝对幅值发生了改变, 浓度越高信号幅值越大。分析通道 1、2 各谱线与标准谱线的相关系数, 其随着浓度的升高有升高的趋势, 在该测量浓度范围内的  $2f$  谱线与标准谱线间具有很好的相关性, 如表 1 所示。

#### 4.2 浓度反演

二次谐波信号的幅度与浓度和光程成正比关系, 因此可以根据标准气体的二次谐波信号, 对待测气体的二次谐波信号进行最小二乘法线性拟合得到拟合系数, 标准气体的浓度乘上拟合系数便得到测量气体的浓度<sup>[6]</sup>。

表 2 列出了两个监测点的实际浓度和计算出的拟合浓度, 以实际浓度为横坐标, 以拟合浓度为纵坐标, 并进行线性拟合, 如图 4 所示, 得到通道 1、2 的线性度分别为 0.99986 和 0.99994, 证明了本系统用于多点甲烷浓度监测的可靠性。

#### 4.3 系统性能分析

对于多点煤矿瓦斯监测系统而言, 其测量的准确性和稳定性及系统响应时间是重要指标。如图 5 所示, 用浓度为 0.1% 和 1% 的甲烷标准气体间歇

表 2 通道 1,2 的实际浓度和拟合浓度

Table 2 True concentration and fitted concentration

True concentration	1%	0.4%	0.2%	0.1%
Fitted concentration (channel 1)	1.09880%	0.45147%	0.25238%	0.12931%
Fitted concentration (channel 2)	1.13442%	0.46120%	0.25022%	0.13142%

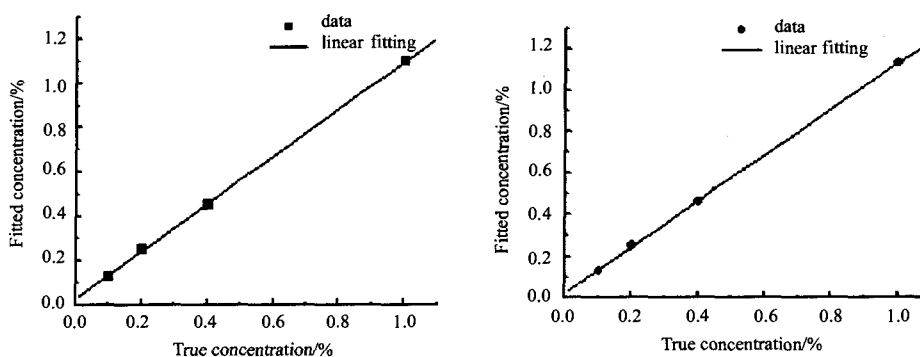


图 4 实际浓度与拟合浓度值间的线性关系

Fig.4 Linearity between true concentration and fitted concentration

地在一个微型吸收池附近 10 cm 处释放, 气体流速为 1 l/min。图中显示了连续监测浓度值, 当外界甲烷气体浓度变化时, 系统测得的浓度值随之变化, 可以长时间稳定地监测环境中瓦斯的浓度。

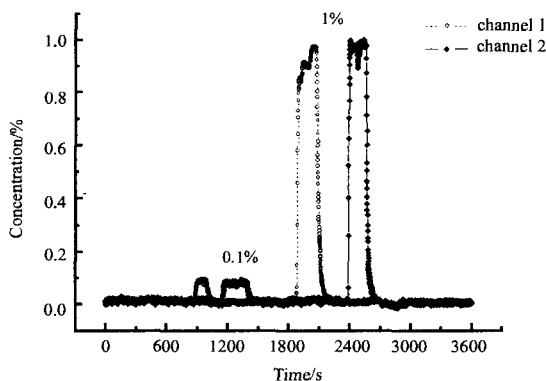


图 5 浓度变化曲线

Fig.5 Concentration variation curve

检测灵敏度是监测系统的重要参数, 根据煤矿安全规程规定, 瓦斯检测仪器的报警限为 1%。按照一倍信噪比进行计算<sup>[7]</sup>, 仪器达到的检测限小于  $60 \times 10^{-6}$ , 可以满足煤矿瓦斯浓度检测的实际需求。

实验过程中对二次谐波信号进行了 50 次的累加平均, 即每个点位检测的时间分辨率为 1 s, 两点分时监测的周期大约为 2 s, 可以进一步减少采样平均次数来降低响应时间, 满足监测时间响应的需要。

## 5 结 论

系统有效地把 TDLAS 技术和分布式光纤传感技术、时分复用技术相结合, 提出了多点瓦斯监测系统方案, 完成了系统的测试。设计了适用于煤矿井下环境的微型光吸收池, 结合实际监测的需求, 提出了在光路中嵌入标定池反演浓度的方法。系统具有灵敏度高、选择性好、响应速度快等特点, 检测限低于  $60 \times 10^{-6}$ , 其结构简单, 便于光路调节, 使用安全, 适用于煤矿井下瓦斯的连续实时监测。

作者简介: 何莹 (1983-), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事可调谐半导体激光吸收光谱法痕量气体检测的应用研究。

## 参考文献:

- [1] Culshaw B, Stewart G, Dong F, et al. Fibre optic techniques for remote spectroscopic methane detection - from concept to system realization [J]. *Sensors and Actuators*, 1998, B51: 25-37.
- [2] Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. Concentration calibration method of ambient trace-gas monitoring with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(3): 392-395 (in Chinese). 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测大气痕量气体中的浓度标定方法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(3): 392-395.
- [3] Werle P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. *Spectrochimica Acta*, 1998, A54: 197-236.
- [4] Barrass S, Gérard Y, Holdsworth R J, et al. Near-infrared tunable diode laser spectrometer for the remote sensing of vehicle emissions [J]. *Spectrochimica Acta*, 2004, A60: 3353-3360.
- [5] Chen Dong, Liu Wenqing, Kan Ruifeng, et al. Gas sensing by near-infrared tunable diode laser spectroscopy method [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(4): 598-600, 603 (in Chinese). 陈东, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的瓦斯监测方法研究 [J]. *光学技术*, 2006, 32(4): 598-600, 603.
- [6] Wang Xiaomei, Zhang Yujun, Liu Wenqing, et al. Study on the arithmetic of trace gas concentration based on tunable diode absorption spectroscopy [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 717-719 (in Chinese). 王晓梅, 张玉钧, 刘文清, 等. 可调谐二极管吸收光谱痕量气体浓度算法的研究 [J]. *光学技术*, 2006, 32(5): 717-719.
- [7] Ho Hoilut. Multi-point fiber optic gas sensor system [D]. Hong Kong: Doctorial Dissertation of Hong Kong Polytechnic University, 2002, 44.